

CÁLCULO DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE Y EMISIONES DE CO₂ DE CAMIONES MINEROS, MEDIANTE SIMULACIÓN DISCRETA

FUEL CONSUMPTION AND CO₂ EMISSIONS MEASUREMENT OF MINING TRUCKS, USING DISCRETE SIMULATION[♣]

Daniel Bórquez Dönicke^{1,♦}, Francisco Ramis Lanyon²

RESUMEN

El empleo intensivo de camiones de alto tonelaje en las operaciones mineras a cielo abierto, los costos de operación y las emisiones de gases de efecto invernadero generadas por el consumo de combustible de los camiones, presentan un contexto para la búsqueda de soluciones que orienten el uso de los recursos a la disminución de costos, pero considerando al medio ambiente como una variable de decisión. El objetivo de esta investigación fue el desarrollo de un modelo de simulación para el cálculo del consumo de combustible y la cuantificación de la emisión de CO₂ asociados a los camiones mineros, para alcanzar lo anterior se utilizó la metodología que describe 7 actividades para el logro de un estudio de simulación exitoso. El modelo construido incorpora la cinemática y dinámica del camión, agregando además, el comportamiento ante eventos como interacciones (congestión) con los demás equipos. De los resultados obtenidos se destacan, la cuantificación de las interacciones (congestión) en los indicadores de consumo y emisión y la diferencia en la forma de calcular las emisiones de CO₂, actualmente se realiza con la factura del combustible que ha sido utilizado, por el contrario, el modelo basa su cálculo en la energía utilizada para mover el camión. Para la flota de camiones que se modeló, la emisión media fue de 2,5 k. CO₂/litro de combustible quemado, comparado con los 2,69 kg CO₂/lt de combustible quemado que define el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Inferir y cuantificar, como propone esta investigación, el consumo de combustible de los camiones en operaciones mineras y sus consecuencias como las emisiones de CO₂, incorporando el comportamiento ante la congestión y variables dinámicas como la pendiente, resistencia a la rodadura, carga, rimpull, entre otros, permite analizar el desempeño de soluciones operacionales, adquiriendo una visión detallada del comportamiento del consumo de combustible en la dinámica de las operaciones, teniendo así el impacto al medio ambiente para cada solución en búsqueda de la minimización de costos.

Palabras Clave: Simulación camiones mineros, Consumo de Combustible, Emisión de dióxido de carbono.

¹Programa Magister en Ingeniería Industrial, Universidad del Bío-Bío, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Industrial, Concepción, Chile. orcid.org/0000-0003-4624-3975.

² Universidad del Bío-Bío, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Industrial, Concepción, Chile. orcid.org/0000-0001-5896-7407.

Autor para correspondencia: dborquez@ubiobio.cl.

Recibido: 13.01.2017 Aceptado: 23.04.2017

ABSTRACT

The intensive use of trucks in the open pit mining operations, the costs of operation, and emissions of greenhouse gases generated by the fuel consumption of trucks presented a context for the search for solutions that will guide the use of resources to the reduction of costs, but considering the environment as a variable decision. The objective of this research was the development of a simulation model for the calculation of fuel consumption and the quantification of the emission of CO₂ associated with the mining trucks, to achieve the above it was used the methodology that describes 7 activities for the achievement of a successful simulation study. The constructed model incorporates the kinematics and dynamics of the truck, adding, the event behavior as interactions (congestion) with the other teams. The results obtained are highlighted, the quantification of interactions (congestion) in indicators of consumption and emission and the difference in the way of the calculation of CO₂ emissions, is currently done with the invoice of the fuel that has been used, on the other hand, the model based its calculation on the energy used to move the truck. For the fleet of trucks used as a model, the average was 2,5 kg CO₂/liter of fuel burned, compared with the 2,69 kg CO₂/lt of fuel burned that defines the Intergovernmental Group of Experts on Climate Change. Infer and quantify, as this research proposes, the fuel consumption of trucks in mining operations and their consequences as CO₂ emissions, incorporating the behavior before congestion and dynamic variables such as slope, rolling resistance, load, rimpull, among others, allows to analyze the performance of operational solutions, acquiring a detailed view of the behavior of fuel consumption in the operations dynamics, thus having the impact on the environment for each solution in search of cost minimization.

Keywords: Mining truck simulation, fuel consumption, emission of carbon dioxide

INTRODUCTION

En la actualidad, el proceso de selección de camiones para proyectos mineros contempla la utilización de diversos programas computacionales para estimar la productividad y costos respectivos. Debido a la complejidad de las operaciones de explotación, las distintas herramientas utilizadas han recurrido a suposiciones y restricciones en sus modelos para resolver de forma efectiva el número de equipos que requerirá una determinada faena de explotación (Burt *et. al.*, 2005).

Normalmente, estas suposiciones y restricciones desprecian el carácter dinámico de los vehículos (aceleración, frenado y curvas) (Perdomo, 2001). Esto da lugar a modelos inadecuados para evaluar el impacto que las condiciones de operación tienen sobre el consumo de combustible e indirectamente en la productividad. En otras palabras, al despreciar el comportamiento dinámico de los equipos, los modelos utilizados abordan la productividad y eficiencia de las operaciones bajo la suposición de que el desempeño de los camiones, el consumo de combustible y las emisiones de CO₂ han sido indiferentes a las condiciones de operación.

Para cuantificar el consumo de combustible, se ha investigado el efecto que produce algunas variables indirectamente como el diseño de las rutas en las velocidades que desarrollan los

camiones, caracterizando el camino con parámetros como el porcentaje y los cambios de pendiente (Marambio, 2010). Del mismo modo, variables directas como las aceleraciones máximas sobre la base de la fuerza de tracción, resistencia a la rodadura y resistencia aerodinámica que presentan los pilares de un modelo de la dinámica de un vehículo (Rakha *et. al.*, 2001).

Variables como el balance de masa, dinámica el vehículo y características del motor, además de eventos asociados a los equipos mineros, han sido utilizadas para relacionar el consumo de energía de camiones mineros, teniendo una relación directa con el consumo específico de combustible (Sahoo *et. al.*, 2014).

Una variable que cambia a través de una operación minera, es la carga que transporta un camión, variando así su masa (tara + carga), dado lo anterior, los resultados del estudio realizado por Tolouei & Titheridge (2009) han indicado que el consumo de combustible fue proporcional a la masa del vehículo para diferentes configuraciones de tipos de combustible y transmisión.

Xiao *et. al.*, (2012), concluyen que el consumo de combustible ha sido susceptible a la caracterización de la ruta por el cual se desplaza el vehículo, impactando en la tasa de consumo. Los autores hacen énfasis en que los futuros estudios, se incorporen variables que afectan al consumo de combustible como la geometría de la ruta y velocidades de los vehículos.

La geometría de la ruta ha sido citada por varios autores, estos han definido que es una variable que influye en el consumo de combustible y emisiones de CO₂. En este contexto, Oh *et. al.*, 2014, han concluido que el peso o masa bruta del camión fue la variable más influyente en el consumo de combustible por sobre la resistencia a la rodadura (variable con directa relación a la ruta), coeficiente de resistencia al aire, área frontal y modo de conducción.

El consumo de combustible tiene como consecuencia emisiones de gases de efecto invernadero, lo que tributa a una segunda derivada de investigación, que dice relación con las emisiones de CO₂. En este sentido investigaciones realizadas por Zhang & Frey (2006), consideran que la potencia específica del vehículo (PEV) es útil para explicar una porción substancial de la variabilidad en las emisiones generadas. Esta función PEV está asociada a la velocidad, aceleración y pendiente, en donde se muestra que esta última variable afecta significativamente al valor final de PEV y a las emisiones generadas por los vehículos, lo anterior, ha sido la base para el estudio que realizaron en cuanto a la medición de la pendiente del camino, los cuales han demostrado que el modelo desarrollado para ese fin es confiable y preciso.

Así mismo, Espinal *et. al.*, (2010) ha evaluado el impacto positivo en las emisiones debido a la conducción eficiente del consumo de combustible de camiones de transporte de carga pesada.

Por otra parte, las tasas de emisión de los vehículos dependen del diseño geométrico, intersecciones y rugosidad de la ruta, dado que al someter el motor a aceleraciones y desaceleraciones implican un cambio en las tasas de emisión (Abo-Qudais & Qdais, 2005).

Las emisiones de los vehículos de motor y el consumo de combustible dependen en un gran número de factores que se han podido catalogar en dos áreas (Cloke *et. al.*, 1998), factores técnicos relacionados con el diseño, la ingeniería y los factores operativos.

El consumo de combustible ha sido investigando utilizando diferentes herramientas. Soofastaei *et. al.*, (2016) han estudiado la varianza en la carga que transportan los camiones, indicando su influencia de manera directa al consumo de combustible, mediante estudios de correlación y estadística, obteniendo modelos de predicción en determinadas situaciones de operación sin capacidad de gestión o de poder soportar nuevas condiciones de operación para la estimación de las variables mencionadas. Con regresión de mínimos cuadrados parciales y media móvil integrada auto regresiva, Dindarloo & Siami-Irdemoosa (2016), han analizado las actividades cíclicas y sus efectos en el consumo de combustible, dejando de lado las variables que afectan al consumo (pendiente, resistencia a la rodadura, rimpull, etc.), y solo enfocándose en actividades operacionales, teniendo como objetivo minimizar el tiempo de estas actividades para que el tiempo en que este esperando el camión sea mínimo, implicando que el motor tenga menos horas de funcionamiento, es decir, se obtiene un menor consumo de combustible, el cual no provee una visión del comportamiento del consumo de combustible y las emisiones de CO₂ que se generan en las operaciones.

Rodvalho *et. al.*, (2016), utilizaron un método estadístico para elaborar una ecuación que permite inferir el consumo de combustible. Bajo este prisma se agrupan varias variables individuales que afectan al consumo de combustible pero, con nula capacidad de gestionar sobre ellas, es decir, entender el cómo cada una de las variables impactan en el comportamiento del consumo de combustible, dado que, al utilizar datos y ajustarlos a comportamientos determinados, solo funcionan para esos comportamientos, entonces un cambio en ellos, implica que, al utilizar la misma ecuación no se obtendrán respuestas del comportamiento deseado. Por otro lado, la congestión producida en las operaciones se pasa por alto y se toma como un todo y no un resultado de las operaciones.

Soofastaei *et. al.*, (2016) utilizaron un modelo de simulación de eventos discretos para evaluar situaciones operacionales y sus efectos en el consumo de combustible, teniendo como objetivo el aumento de la producción y la disminución del consumo de combustible pero desde el punto de vista operacional, relacionando las palas con los camiones y que estén perfectamente alineados para aumentar la producción. Este enfoque se concentra en disminuir las esperas de los camiones, provocando una visión mínima del comportamiento del consumo de combustible y sus efectos hacia el medio ambiente, es decir, con nula capacidad de gestionar las variables como producción y consumo de combustible como un conjunto de variables que no trabajan por separado, sino todo lo contrario.

Patterson *et. al.*, (2017) trabajando con programación lineal para la minimización del consumo de combustible en operaciones mineras, ha detectado brechas para la minimización, y han propuesto un modelo considerando cambios en las condiciones de operación, como por ejemplo cambios en la ruta de tránsito.

Modelos flexibles deben responder a cambios en las variables que inciden en la energía o consumo de combustible y la interacción de dichas variables simultáneamente, lo anterior nace desde el estudio del comportamiento del consumo de combustible, luego se podrá observar la operación y cuantificar soluciones orientadas a la minimización de costos pero incluyendo las consecuencias de tales soluciones en el medio ambiente.

El término congestión o interacción, define un campo que se abordará con este trabajo, dado que ante este fenómeno los camiones adoptan un comportamiento controlado por los operadores, la idea es poder cuantificar el efecto de esto en el consumo de combustible.

El estudio de las variables que afectan al consumo de combustible y emisiones de CO₂ es amplio y profundo, sin embargo no ha sido estudiado en detalle sobre la interacción

simultanea de todas las variables, en donde el camión sea un objeto dinámico y responda a la física que lo gobierna (aceleración, potencia, velocidad, entre otras).

Por tanto, las variables a considerar por esta investigación serán las siguientes:

1. Geometría de la ruta (pendientes, radios de curvatura y resistencia a la rodadura).
2. Aceleración y velocidades máximas del camión.
3. Potencia del motor, capacidad o potencia de frenado y carga transportada.
4. Comportamiento de los camiones ante eventos como las interacciones (congestión) con los demás equipos.

Considerando lo expuesto anteriormente, se propone la siguiente hipótesis de trabajo: "El modelamiento del comportamiento dinámico de los camiones mineros y la incorporación de la interacción entre las variables que impactan en el desempeño del camión, permite cuantificar el consumo de combustible y calcular las emisiones de CO₂ en las operaciones de una mina a cielo abierto."

1. Para satisfacer la hipótesis planteada, se definen los siguientes objetivos:
2. Identificar las variables que caracterizan el consumo de combustible y emisión de CO₂, mediante revisión bibliográfica.
3. Establecer funciones para el cálculo de: velocidades, energía, consumo de combustible y emisiones de CO₂, asociados al camión minero.
4. Construir un modelo de simulación que incorpore las funciones y variables identificadas.

METODOLOGIA

La metodología utilizada es la que propone Law (2015), describiendo 7 actividades para el logro de un estudio de simulación exitoso, a continuación se describen las actividades más importantes de la metodología.

Formulación del problema: El contexto del problema tiene como característica la utilización intensiva de camiones de alto tonelaje. Luego de la estadía en terreno en una mina en operaciones reales se establecieron los límites y generalización del problema a resolver, caracterizándolas en la figura 1.

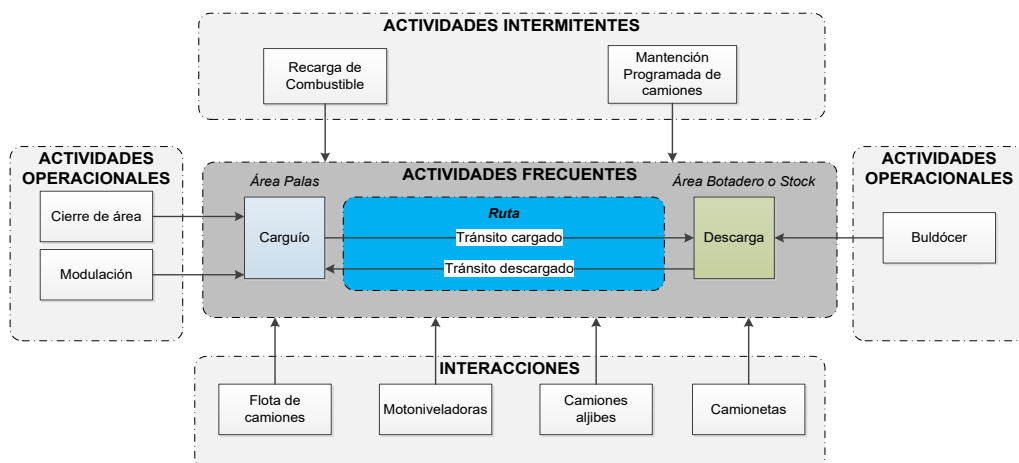


Figura 1. Esquema general del problema a estudiar.

Caracterización del problema

Cuatro factores se establecieron como preponderantes en las actividades realizadas por el camión. Tres factores tienen que ver con actividades de naturaleza externa al control del camión afectando directamente la operación en sí, por otro lado, un cuarto factor tiene que ver con las interacciones o congestión que se generan en la ruta de tránsito, esto implica un comportamiento del camión ante este fenómeno. Para que estos factores impacten en las variables de estudio el problema se separó en dos grandes áreas, una abordada por medio de **funciones** definidas para desarrollar el cálculo del consumo de combustible y de CO₂ y la otra abordada a través del desarrollo de un camión capaz de reaccionar ante el fenómeno de las **interacciones**.

Funciones Camión Minero

Se definieron cinco funciones capaces de cuantificar el impacto de factores físicos y dinámicos en el consumo de combustible y emisiones generados en la dinámica de las operaciones del camión. Se calculó con la **función velocidad admisible (FVA)**, las velocidades máximas que puede desarrollar el camión y mantenerse en la zona de control. Con la **función perfil de velocidad y anticipación del frenado (FPVAF)**, se obtuvo las velocidades y aceleraciones instantáneas desarrolladas a lo largo de su viaje además de calcular la distancia para frenar a tiempo, la **función de energía (FE)**, sirve para calcular la energía necesaria para llegar a las velocidades calculadas, esta energía tiene como objetivo poder calcular, a través de la **función consumo de combustible (FCC)**, la cantidad de combustible utilizado. Finalmente la **función de emisiones (FCO₂)**, incluyó la información de la energía y obtuvo las emisiones de CO₂ generadas para la velocidad, aceleración y consumo de combustible determinados en un instante de tiempo. En las áreas de carga y descarga el camión se desplaza con una velocidad media, y las esperas se establecieron con el motor en régimen de ralentí. En la figura 2, se describen los parámetros y variables abordados con las funciones descritas. Para cada segmento i se tiene una resistencia a la rodadura (R_R), un coeficiente de roce (C_{re}), una pendiente (θ_i), una velocidad admisible (V_{AD_i}) y una aceleración admisible (a_{AD}), con estos

parámetros se calculan las aceleraciones instantáneas ($a_{i,j}$, en el segmento i para el tramo j) que dependen de la carga transportada, el área frontal, pendiente, velocidad inicial ($V_{i,j}$) y por la fuerza disponible en la rueda (rimpull ($R_{i,j}$)). Con la aceleración instantánea y la distancia podemos calcular la velocidad al final del segmento i para el tramo j , $V_{f_{i,j}}$.

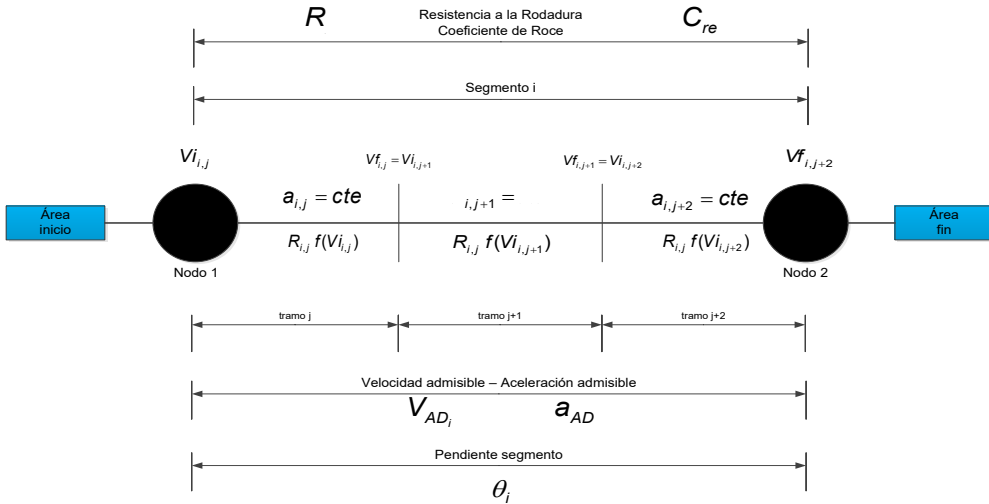


Figura 2. Esquema general del problema a estudiar.

Con la ecuación 1 se calculó la energía utilizada.

$$E_{i,j} = \text{Potencia}_{i,j} * \text{tiempo}_{i,j} \quad \text{Ecuación (1)}$$

Dónde:

- $E_{i,j}$ = Energía utilizada en el segmento i , para el tramo j (kJ).
- $t_{i,j}$ = Tiempo transcurrido en el segmento i , para el tramo j (s).
- $\text{Potencia}_{i,j}$ = Potencia utilizada en el segmento i , para el tramo j (kJ/s).

Para cada segmento se calculó la potencia (Potencia = rimpull * velocidad) y así la energía necesaria para producir el desplazamiento del camión. Con la ecuación 2 se calculó el consumo de combustible.

$$\text{Dónde: } C_{i,j} = \frac{E_{i,j}}{PCI * \delta * \eta_1 * \eta_2 * \eta_3} \quad \text{Ecuación (2)}$$

- $C_{i,j}$ = Consumo de combustible asociado en el segmento i , para el tramo j (l.).
- $E_{i,j}$ = Energía utilizada en el segmento i , para el tramo j (kJ.).
- PCI = Poder calorífico inferior del diésel (kJ/kg).
- η_1 = Eficiencia eléctrica.
- η_2 = Eficiencia eléctrica.
- η_3 = Eficiencia del motor a combustión.
- δ = Densidad diésel (kg/m³).

Interacciones (Congestión)

Estas definen el comportamiento del camión ante eventos que suceden en la ruta de tránsito, estos eventos se cuantificaron a través de las funciones descritas anteriormente. Las interacciones se dividieron en tres, una tiene relación con los equipos auxiliares, la segunda es la interacción con las camionetas que trabajan en las operaciones mineras y la tercera interacción es con la misma flota de camiones, dado que se pueden encontrar en cualquier punto de la ruta de tránsito. Para la definición de la interacción, se necesita que el camión la detecte, para esto, se definió la longitud de esta visión (hacia adelante y hacia atrás), esto para poder detectar el tipo de interacción. Cabe señalar, que el problema de las interacciones se abordó solo en la ruta de tránsito y no en las áreas de carguío o descarga.

Desarrollo del modelo conceptual y obtención de información/datos

El modelo general representado en la figura 3, refleja la operación que ejecuta el camión en las áreas de carguío u origen, la ruta de tránsito y el área de destino (descarga de lastre o descarga de mineral), cada vez que el camión debe enfrentar la ruta, realiza el cálculo de las velocidades a desarrollar por medio de las funciones descritas.

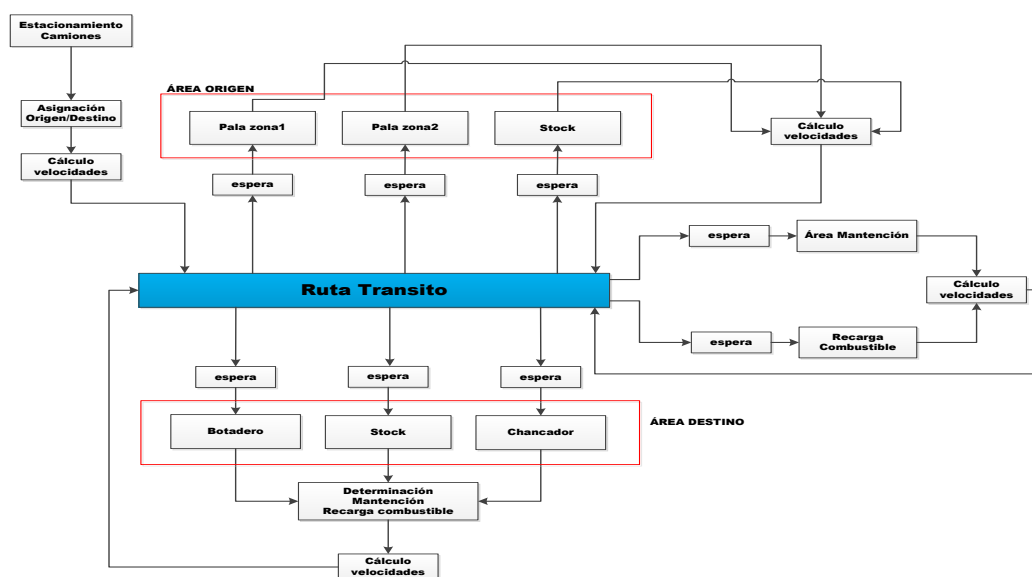


Figura 3. Modelo conceptual general

Construcción y verificación del modelo computacional

En la figura 4 se observa la ruta en 3D por la cual se trasladan los camiones, cada uno de los puntos en negro, represento un nodo caracterizado por coordenadas x, y, z.

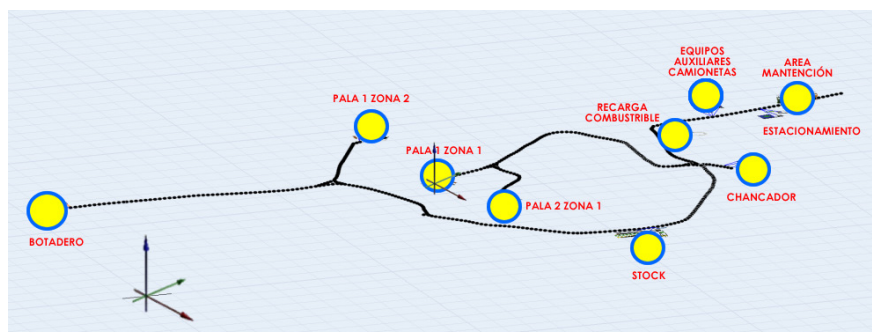


Figura 4. Camiones mineros en operaciones.

El modelo corrió un día de operación, correspondiente a dos turnos obteniendo los siguientes indicadores de desempeño: **Emisión [Kg. CO₂ / l]**: Define la cantidad de kilos de CO₂ equivalentes generados por cada litro de combustible quemado por el motor diésel (este indicador se calculó a través de la metodología establecida por el grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático (IPCC (2006), Emisión = Energía * Factor de emisión). **Energía [TJ]**: Define la cantidad de energía utilizada por el camión, durante toda la operación minera. **Consumo de combustible [l]**: Litros de combustible total utilizados por el camión. **Material [ton]**: Cantidad de material movido por el camión. **Distancia [km]**: Distancia total recorrida para cada uno de los camiones.

Validación modelo computacional

El modelo quedo validado mediante el indicador de desempeño asociado a la producción de mineral chancado.

También se calculó mediante la función FCO2 la cantidad de CO2 por unidad de volumen que se genera al ambiente durante la operación del camión, que según la IPCC es del orden de 2,6912 kg CO2/litro. Como resultado, el modelo arrojo en promedio 2,5 kg. CO2/litro, teniendo una diferencia del orden del 7%.

Análisis de los datos de salida

Para este estudio en particular, no se diseñaron experimentos, dado que el objetivo fue diseñar un modelo de simulación para el cálculo del consumo de combustible y emisión de CO2.

RESULTADOS

Para el análisis de los datos se escogió una ruta en específico, donde el camión se desplaza cargado subiendo desde la pala 2 (zona 1) hacia el chancador. Otra ruta seleccionada está relacionada con la evaluación del impacto de una interacción del camión con una camioneta, ocasionando la detención por completo y luego el arranque del móvil para seguir su ruta.

Indicadores de desempeño camión cargado

El eje x de la figura 5 describe la distancia recorrida por un camión cargado, es decir, alrededor de 2058 km. La curva que representa la cota (línea verde), describe el movimiento del camión, este se desplaza hacia el chancador subiendo alrededor de 120 m en el eje z. La línea roja representa la velocidad admisible por el camión, calculadas mediante la función FVA, en donde la velocidad límite fue de alrededor de 14 m/s, se calcularon 4 caídas de velocidad siendo la más importante la denotada con el número 1, esta define la anticipación al frenado

que debe ejecutar el camión dado que entra al área de destino. Se observa claramente que la primera zona de la ruta (427m) se caracteriza por una leve inclinación hacia abajo en el eje z (-1m. aproximadamente), permitiendo en conjunto con la fuerza disponible, desarrollar velocidades crecientes hasta alcanzar el límite máximo de velocidad. Un fenómeno similar se observa en la zona donde la velocidad vuelve a ser creciente, que tiende a mantener una pequeña variación hacia arriba en el eje z, alrededor del 1% de pendiente por 134 m. Lo anterior se vuelve a observar en la tercera zona donde el camión aumenta su velocidad por alrededor de 220 m. y una pendiente de 54 por ciento aproximadamente.

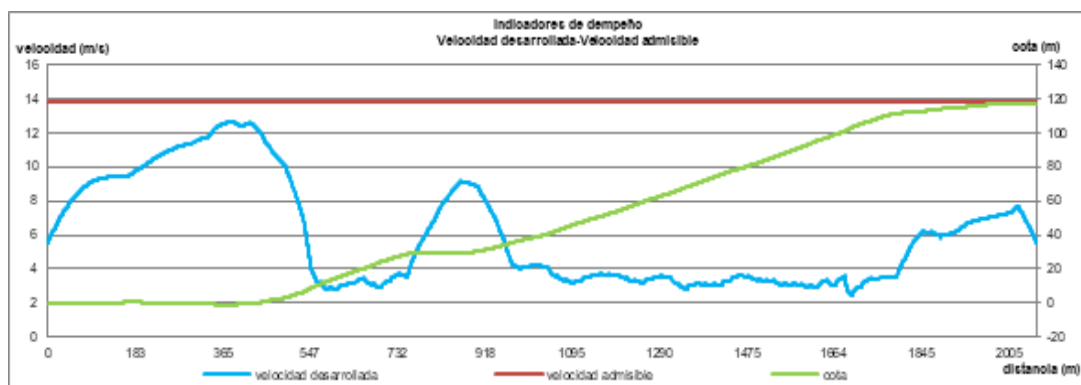


Figura 5. Velocidad admisible y desarrollada, camión cargado.

Las velocidades decrecientes que el camión desarrolló, se debe al porcentaje de pendiente que alcanzó alrededor del 10% por tramos definidos por 327m y 817m, respectivamente. Cabe señalar, que la última zona donde se encuentra la anticipación al frenado, el camión disminuye su velocidad por la aplicación del freno y no por pendiente o energía insuficiente. En la figura 6 se observa, para el mismo camión anterior, la evolución del consumo de combustible, fuerza de rimpull disponible en las ruedas y velocidad desarrollada a lo largo de la ruta. El consumo de combustible del camión tiene un comportamiento proporcional con respecto al rimpull, no obstante, al final de la ruta el motor entra en régimen de ralentí, ocasionando que, la potencia utilizada para el cálculo del consumo de combustible describa ese régimen. La potencia mínima (a pesar que la tendencia de este valor es más menos constante) se consiguió cuando el camión alcanzó la velocidad límite calculada con la función FVA, esto se explica por la pendiente negativa que transita a la salida de la pala, es decir, la geometría de la ruta ayuda para que el camión acelere implicando una disminución del rimpull en las ruedas.

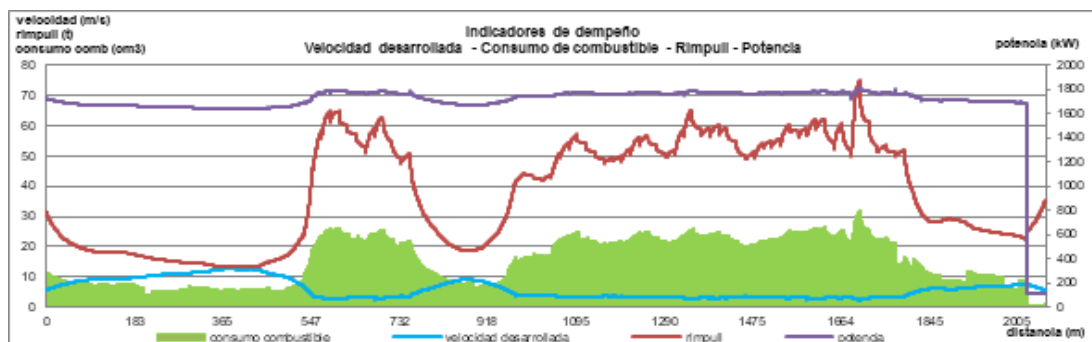


Figura 6. Consumo de combustible, velocidad desarrollada, rimpull, potencia.

Cada vez que el camión enfrente pendientes del orden del 9%, la potencia utilizada fue creciente al igual que el consumo de combustible, manteniendo la tendencia del rimpull utilizado.

En la figura 7 se observa la evolución (para el camión anterior) del indicador asociado a la emisión de CO₂, durante el tránsito sobre la ruta, en contraste con la velocidad desarrollada y rimpull o toneladas fuerza en la rueda del camión. La emisión de CO₂ tiene un comportamiento similar al indicador de desempeño asociado al consumo de combustible, teniendo directa relación. En las zonas en donde la geometría de la ruta exige al camión, representado por las caídas de la velocidad desarrollada, la cantidad de CO₂ emitido al ambiente aumenta, a excepción del final de la ruta, que por restricción de velocidad en el área de descarga (chancador), debe, por medio de la función FPVAF calcular y definir las velocidades y distancia de frenado, llevando las emisiones de CO₂ a niveles mínimos, dado el régimen de ralentí del motor diésel cuando el camión está frenando.

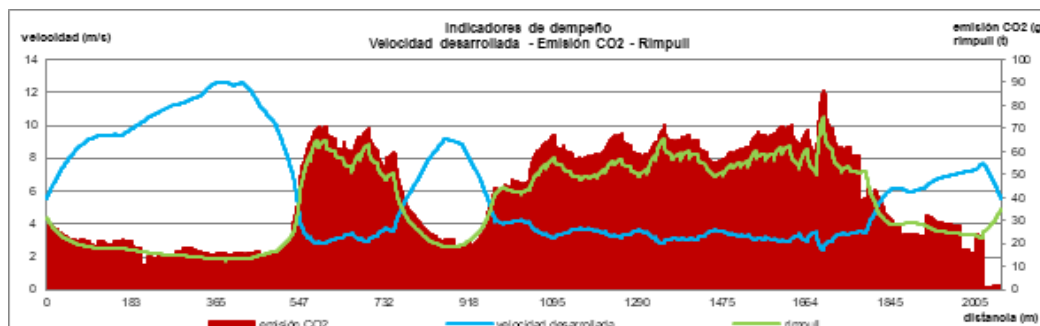


Figura 7. Emisión de CO₂, velocidad desarrollada, rimpull, camión descargado

En resumen, en la operación de traslado de mineral ascendiendo unos 120m aproximadamente en el eje z, se utilizó 762,3 MJ de energía, quemando unos 85,9 litros de combustible y generando 232,5 kg de CO₂.

Indicadores de desempeño camión con interacción

En la figura 8 se observan los indicadores de desempeño asociados al camión transitando con una condición de carga definida a viajar vacío, bajando desde el chancador a la pala 2 de la zona 1. La zona superior de la figura se muestran los indicadores que representan un viaje

sin ningún tipo de interacción, luego, debajo de la figura, se muestran los indicadores que representan un viaje asociado a un evento de interacción, generando la caída de velocidad, provocando la detención completa del camión en una zona con una pendiente negativa del orden del 9%.

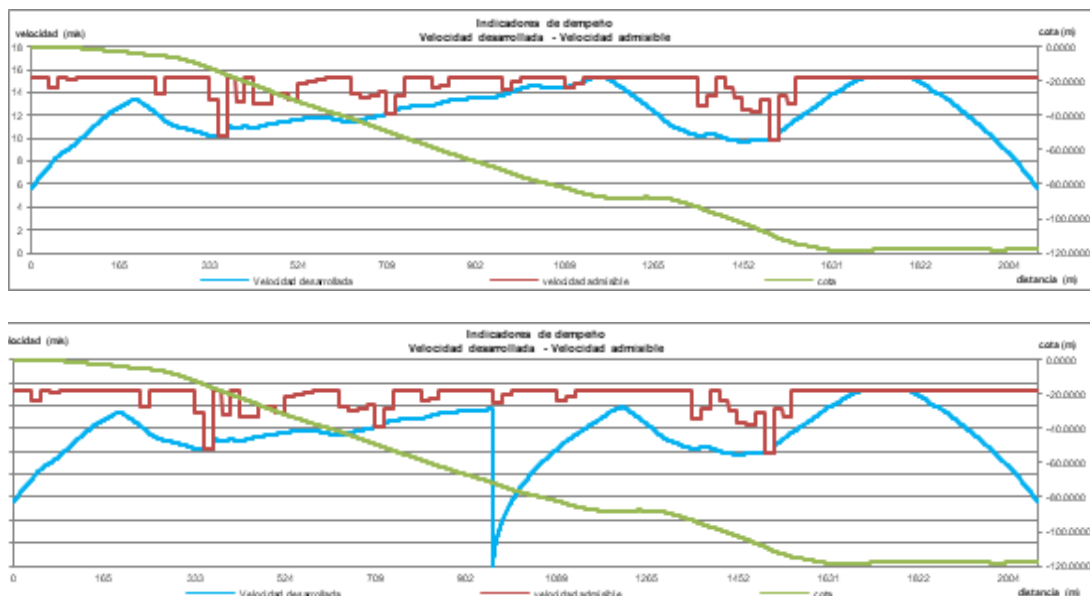


Figura 8. Indicadores de desempeño.

El tiempo de detención se calculó en función de parámetros operacionales, una vez transcurrido el tiempo se procede a calcular mediante la función FPVAF las velocidades para arrancar el camión desde el reposo.

En la figura 9 se observa lo que significa que el camión interactúe con algún equipo auxiliar, en la zona de interacción, definida por el cuadrado rojo, se utilizó la máxima fuerza de rimpull que el camión tiene disponible para salir del reposo, esto tiene varias aristas, una de ellas es la generación máxima de potencia en la ruta de tránsito, otra de ellas es el máximo consumo de combustible. El camión sin interacción en ese punto, estaba frenando dada la geometría de la ruta (plasmada en las restricciones de velocidad), por lo que el consumo de combustible fue el mínimo que se puede obtener, es decir, se pasó de consumir para la distancia donde se utilizó el máximo rimpull (4 m) de 4,2 cm³ a 407 cm³, aumento unos 9600%, a causa de la interacción, para la distancia de máximo rimpull. Por otra parte, en los tramos que se utilizaron para que el camión vuelva a la normalidad, es decir, volver a frenar después de la interacción (entrar nuevamente al régimen de ralentí) se consumieron 5,4 litros de combustible, lo cual si no hubiese existido la interacción, en los mismos tramos el consumo hubiese sido del orden de 1,05 litros de combustible, (en las zonas donde el motor se encuentra en ralentí define que el camión en esos casos específicos está frenando).

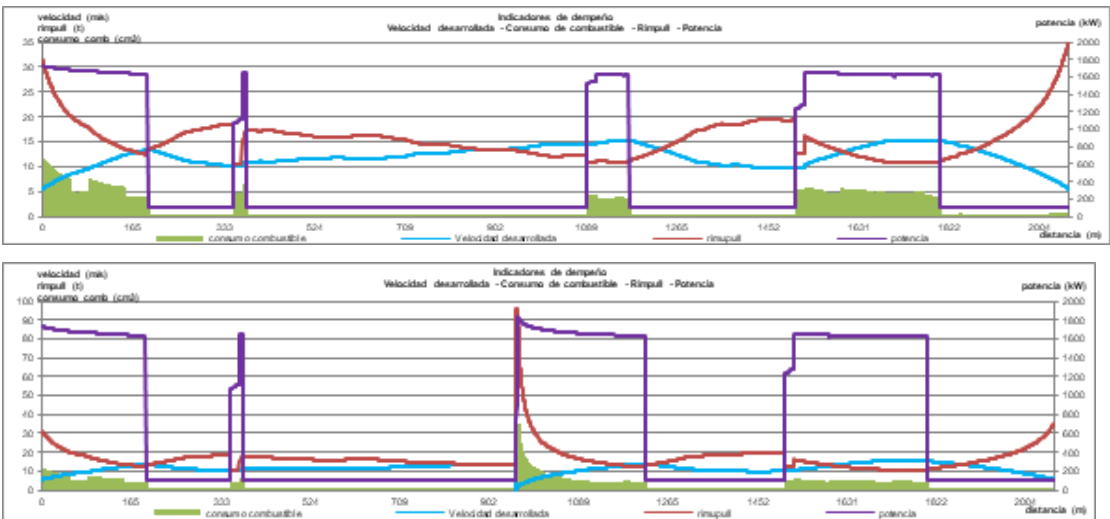


Figura 9. Consumo de combustible, velocidad desarrollada, rimpull, potencia, interacción

En la figura 10 se observa que para el tramo (4 m) donde se utilizó el máximo rimpull, asociado a la curva con interacción, el camión generó, unos 110 g de CO₂ como máximo sumando 1282 g de CO₂ para el total del tramo, de no existir dicho evento solo se hubiese generado 11,5 g de CO₂ para dicho tramo. Por otro lado, en los tramos (254 m) utilizados por el camión para alcanzar la velocidad normal definida cuando no hay interacción, la cantidad de CO₂ generado fue de 2,84 kg, en contraste con los 17,11 kg generados por la interacción.



Figura 10. Efecto de una interacción en la cantidad de CO₂ emitido al ambiente

En resumen, una vez que el camión termina el tránsito de su ruta, sin interacciones, utiliza 93,5 MJ de energía, para lo cual necesitó 10,5 litros de combustible, generando 28,5 kg de CO₂. Ahora bien, si se incluye la interacción, el camión utilizó 140 MJ de energía, consumiendo 14,93 litros de combustible y generando 42,8 kg. CO₂.

Indicadores de desempeño para la flota de camiones

Para las 24 horas de operación modeladas se obtuvieron los siguientes datos promedios para el consumo de combustible, descritos en la tabla 1. La operación minera se dividió en tres sectores de carga, donde la pala1 de la zona 2 corresponde al sector 3, con una distancia de 1,7 km y 6 camiones asignados. La pala 2 de la zona 1, corresponde al sector 2 con 4

camiones asignados y 2 km de distancia, por último la pala 1 de la zona 1 con 6 camiones asignados y 1,8 km de distancia. Las distancias descritas corresponden a los kilómetros que existen entre la carga de los camiones y la descarga de éstos.

El sector 1 y 2 están posicionados en el fondo de la mina teniendo una diferencia en el eje z de 120 m. aproximadamente, esto para dirigirse con el mineral al chancador. Para la cantidad de litros consumidos por estos sectores muestran una diferencia de 1,1% dado a que se enfrentan a la misma geometría de ruta para transitar, el material movido por los camiones del sector 2 es 1177 t más que el sector 1, recordando que cada camión mueve 300 t de mineral, la diferencia entre el sector 2 y el sector 1 es de 4 ciclos, que representan el 1,7 por ciento. Los litros consumidos se distribuyen en 4 camiones y no en 6 como en el sector 1. En cuanto a la distancia recorrida, claramente es menor en el sector 2 por la cantidad de camiones, no obstante mueven más menos la misma cantidad de material, por lo que los camiones del sector 2 compensan esto con una mayor cantidad de ciclos en la operación. En cuanto al sector 3, estos camiones transportan lastre desde la pala 1 de la zona 2 hacia el botadero, la geometría de la ruta no tiene importantes cambios en su pendiente, esto implica que la cantidad de combustible sea más baja que los otros dos sectores, independiente que muevan en los mismos ciclos del sector 1 aproximadamente la misma cantidad de material.

Áreas	Camión	Consumo de Combustible (litros)			Ralentí Carga		Ruta	Ralentí Descarga		Ruta	Distancia km	Material t	Ciclos
		Ruta	Ralentí	Total CC	Espera	Proceso	Cargado	Espera	Proceso	Descargado			
Sector 1	1	3506	532	4 128	0.5%	2.0%	77.8%	8.3%	1.8%	9.3%	161.1	11082	42
	2	3673	520	4 193	0.8%	2.0%	78.2%	7.9%	1.8%	9.4%	163.4	11308	34
	3	3616	537	4 153	0.8%	2.0%	77.4%	8.6%	1.8%	9.6%	161.1	11109	38
	4	3417	511	3928	0.8%	2.0%	77.3%	8.5%	1.8%	9.5%	152.9	10839	39
	5	3291	492	3783	0.7%	1.9%	77.4%	8.7%	1.7%	9.5%	147.5	10153	39
	6	3304	496	3801	0.8%	1.9%	77.5%	8.6%	1.8%	9.4%	147.3	10116	39
	Total	20898	3089	23986	***	***	***	***	***	***	933.4	64306	231
Sector 2	7	5440	397	5838	0.7%	3.6%	86.6%	0.7%	1.8%	6.6%	204.4	16136	61
	8	5565	424	5989	0.5%	3.6%	86.6%	0.6%	1.8%	6.3%	204.1	16462	58
	9	5466	408	5874	0.2%	3.6%	86.6%	0.7%	1.8%	6.4%	204.2	16336	61
	10	5591	415	6007	0.8%	3.6%	86.3%	0.7%	1.8%	6.7%	203.7	16580	56
	Total	22063	1644	23707	***	***	***	***	***	***	826.4	65484	236
Sector 3	11	2365	739	3104	1.4%	2.7%	57.2%	18.4%	1.3%	19.0%	145.7	11477	42
	12	2356	754	3111	1.4%	2.7%	56.9%	18.6%	1.3%	18.9%	145.0	11605	36
	13	2321	735	3057	1.8%	2.7%	57.0%	18.4%	1.3%	18.9%	143.1	11191	39
	14	2259	728	2985	2.0%	2.6%	56.5%	18.6%	1.2%	19.1%	139.0	10645	42
	15	2341	725	3066	1.6%	2.7%	57.2%	18.2%	1.3%	19.1%	145.2	11069	42
	16	2222	729	2951	1.5%	2.7%	56.7%	19.3%	1.3%	18.7%	136.9	10850	35
	Total	13846	4408	18253	***	***	***	***	***	***	864.9	60837	236

Tabla 1. Desglose consumo de combustible.

Otro aspecto importante que se observa en la tabla 1, es lo referido al cómo se consumieron los litros combustible, por cada uno de los camiones, estos mostraron entre sus sectores similitudes no variando entre ellos de manera importante. El mayor porcentaje de consumo de combustible para los tres sectores, corresponde al combustible consumido en la ruta de tránsito del camión cargado, dado que lo hacen con alrededor de 300 toneladas extras a su peso vacío. Ahora bien, se observa una relación entre la cantidad de camiones asignados a una pala y la cantidad de ciclos que realizan, para el sector 2 responde al 86% aproximadamente el gasto de su combustible, en comparación con el sector 1, que responde al 77% aproximadamente. Para el sector 3, desde el punto de vista de la geometría de la mina esta repercute directamente en la cantidad de combustible que se utiliza para la operación, teniendo alrededor del 57% del combustible consumido en la ruta cargado, en comparación con el sector 1 que tiene la misma cantidad de camiones asignados y prácticamente la misma distancia a recorrer, pero la pendiente a vencer juega un rol primordial en la diferencia del cómo se gasta el combustible.

En la figura 11 se observa lo anteriormente mencionado con respecto al rol de la pendiente en el cómo se gasta el combustible.

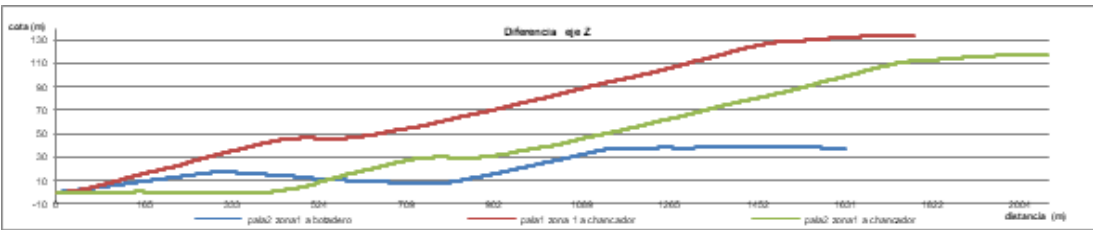


Figura 11. Efecto de una interacción en la cantidad de CO2 emitido al ambiente

Otros indicadores asociados al desempeño del camión, dicen relación con los litros de combustible consumido por cada hora de operación, la energía utilizada, las toneladas de CO2 generados y los kg de CO2 por cada litro de combustible utilizado. En la tabla 2, se observa la directa relación existente entre la cantidad de combustible utilizado con la energía para generar el movimiento del camión. La flota de camiones asociados a las palas de la zona 1 (sector 1 y sector 2), presentan una diferencia del orden del 3 por ciento en cuanto a la cantidad de energía, si bien los camiones del sector 2 consumieron 1,1 por ciento menos que el sector 1, estos gastaron más energía en mover el mineral, explicado básicamente por la mayor cantidad de ciclos realizados al ser menos camiones que el sector 1.

Áreas	Camión	Consumo de Combustible (litros)			Ciclos	l/hr	Energía (TJ)	Ton CO2	kg CO2/litro
		Ruta	Ralentí	Total CC					
Sector1	1	3596	532	4128	42	172.01	0.1446	10.7	2.59
	2	3673	520	4193	34	174.71	0.1482	11.0	2.62
	3	3616	537	4153	38	173.03	0.1460	10.8	2.60
	4	3417	511	3929	39	163.69	0.1372	10.2	2.59
	5	3291	492	3783	39	157.63	0.1336	9.9	2.62
	6	3304	496	3801	39	158.36	0.1336	9.9	2.60
	Total	20898	3089	23986	231	***	0.8433	62.49	***
Sector2	7	5440	397	5838	61	243.23	0.2148	15.9	2.73
	8	5565	424	5988	58	249.51	0.2192	16.2	2.71
	9	5466	408	5874	61	244.76	0.2154	16.0	2.72
	10	5591	415	6007	56	250.28	0.2203	16.3	2.72
	Total	22063	1644	23707	236	***	0.8697	64.4	***
Sector3	11	2365	739	3104	42	129.33	0.0943	7.0	2.25
	12	2356	754	3111	36	129.61	0.0940	7.0	2.24
	13	2321	735	3057	39	127.36	0.0924	6.8	2.24
	14	2239	726	2965	42	123.53	0.0893	6.6	2.23
	15	2341	725	3066	42	127.76	0.0934	6.9	2.25
	16	2222	729	2951	35	122.96	0.0885	6.6	2.22
	Total	13846	4408	18253	236	***	0.6618	40.8	***

Tabla 2. Indicadores de desempeño

La cantidad de CO2 generados por litro de combustible consumido, tiene relación con la diferencia en el eje z que caracteriza la ruta a transitar y la energía utilizada, manteniendo en los sectores una relación similar pero diferente entre ellos. La cantidad de toneladas de CO2 generados en la operación de los camiones en actividades de transporte de mineral y lastre, carga y descarga, durante 24 h fue alrededor de 168 t.

DISCUSIÓN

De la revisión bibliográfica realizada se seleccionaron las variables que impactan en el consumo de combustible y emisiones de CO2 incorporándolas al modelo desarrollado, y complementándolas con las investigaciones de Perdomo (2001) y de Rakha *et. al.*, (2001) como la dinámica de los camiones y características de la ruta, factores relevantes al momento de cuantificar el consumo. Se relevó la variable congestión que se produce en las operaciones

mineras, que de acuerdo a nuestro conocimiento no ha sido abordada por ningún modelo propuesto en la literatura.

La simulación permite generar eventos independientes, que describen la naturaleza de las operaciones. El modelo propuesto en esta investigación, está conformado por distintas funciones que representan la cinemática y el comportamiento dinámico de los camiones, considerando cómo aumentan y reducen sus velocidades en función de sus capacidades, definidas por las curvas de desempeño (rimpull) entregados por el fabricante y factores operacionales más relevantes como la carga, resistencia a la rodadura, arrastre y pendiente que caracteriza a la ruta, en contraste con las investigaciones de Soofastaei *et. al.*, (2016) y Dindarloo & Siami-Irdemoosa (2016).

Un aspecto relevante del estudio tiene que ver con el comportamiento de las velocidades desarrolladas por los camiones, éstas variaron en función de la lectura que se hace de la ruta con diferentes pendientes, resistencias a la rodadura, masa transportada y desempeño de las características técnicas del camión, a diferencia de lo expuesto en Rodovalho *et. al.*, (2016), Soofastaei *et. al.*, (2016) y Patterson *et. al.*, (2017).

La capacidad de adaptación del modelo de simulación, es muy amplia, dado que, éste se puede utilizar con cualquier tipo de camión que cuente con sus curvas de desempeño y las características geométricas de las rutas definidas en un plano con coordenadas x, y, z.

CONCLUSIONES

Inferir y cuantificar, como propone esta investigación, el consumo de combustible de los camiones en operaciones mineras y sus consecuencias como las emisiones de CO₂, incorporando el comportamiento ante la congestión y variables dinámicas como la pendiente, resistencia a la rodadura, carga, rimpull, etc., permite analizar el desempeño de soluciones operacionales, adquiriendo una visión detallada del comportamiento del consumo de combustible en la dinámica de las operaciones, teniendo así el impacto al medio ambiente para cada solución en búsqueda de la minimización de costos.

Estudiar las operaciones mineras desde el punto de vista de la producción basándose en velocidades constantes, impacta directamente en los tiempos de viaje de cada camión, aumentando o disminuyendo la productividad de cada uno de ellos, esto hace que inferir la producción basándose en este tipo de conjetura está claramente errónea. Contrariamente lo que muestra esta investigación, la producción está directamente relacionada con el tiempo de viaje y este con las velocidades que no tienen un comportamiento constante.

Calcular el consumo de combustible y emisiones de CO₂ a partir de las ecuaciones que caracterizan el movimiento del camión, permitió modelar el comportamiento de los camiones ante las interacciones con los demás equipos, proponiendo estándares modificables para cuantificar lo que significa tener ese tipo de eventos al desplazarse por la ruta, teniendo una mirada sistémica de cómo afectan las variables controladas por el camión y aquellas variables que no dependen de ellos, si no, dependen de la naturaleza de las operaciones mineras.

La construcción del modelo computacional fue validando por personal experto, donde se verificó que representan adecuadamente el funcionamiento de las operaciones mineras y la operación del camión, por ende, el resultado de sus análisis admiten un diagnóstico confiable,

en el desempeño del camión.

BIBLIOGRAFIA

ABO-QUDAIS, S., and QDAIS, H. Performance evaluation of vehicles emissions prediction models. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2005, **7**(4), 279-284.

BURT, C., CACCETTA, L., and WELGAMA, P. Models for Mining Equipment Selection 1, 2005.

CLOKE, J., *et al.* Traffic management and air quality research programme. 1998, TRL REPORT 327.

DINDARLOO, S. and SIAMI-IRDEMOOSA, E. Determinants of fuel consumption in mining trucks. *Energy*, 2016, **112**, 232-240.

ESPINAL, A., LÓPEZ, J., and FLÓREZ, J. Evaluación del efecto de la conducción eficiente en el consumo de combustible en vehículos de transporte de carga pesada usando diseño de experimentos. 2010.

IPCC. National Greenhouse Gas Inventories, 2006, vol. 2 Energy.

LAW, A. Simulation Modeling and Analysis, Fifth Edition. New York. USA: McGraw-Hill, 2015.

MARAMBIO PIZARRO, Guillermo. Efecto del Diseño Minero en la Velocidad de los Equipos de Transporte [en línea]. Santiago, Chile: Universidad de Chile - Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2010 [Fecha consulta: 19 de junio 2018]. Disponible en < <http://www.repositorio.uchile.cl/handle/2250/103948>>

OH, Y., *et al.* Modeling effects of vehicle specifications on fuel economy based on engine fuel consumption map and vehicle dynamics. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2014, **32**, 287-302.

PATTERSON, S.R., KOZAN, E., and HYLAND, P., Energy efficient scheduling of open-pit coal mine trucks. *European Journal of Operational Research*, 2017, **262**(2), 759-770.

PERDOMO, J. Detailed haul unit performance model. 2001. Tesis Doctoral. Virginia Polytechnic Institute and State University.

RAKHA, H., LUCIC, I., DEMARCHI, S., SETTI, J., and AERDE, M. Vehicle dynamics model for predicting maximum truck acceleration levels. *Journal of transportation engineering*, 2001, **127**(5), 418-425.

RODOVALHO, E., LIMA, H., and DE TOMI, G. New approach for reduction of diesel consumption by comparing different mining haulage configurations. *Journal of Environmental Management*, 2016, **172**, 177-185.

SAHOO, L., BANDYOPADHYAY, S., and BANERJEE, R. Benchmarking energy consumption for dump trucks in mines. *Applied Energy*, 2014, **13**, 1382-1396.

SOOFASTAEI, A., AMINOSSADATI, S.M., KIZIL, M.S., and KNIGHTS, P. A discrete-event model to simulate the effect of truck bunching due to payload variance on cycle time, hauled

mine materials and fuel consumption. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2016, **26**(5), 745-752.

TOLOUEI, R., & TITHERIDGE, H. Vehicle mass as a determinant of fuel consumption and secondary safety performance, 2009. *Transportation research part D: transport and environment*, 2009, **14**(6), 385-399.

XIAO, Y., ZHAO, Q., KAKU, I., and XU, Y. Development of a fuel consumption optimization model for the capacitated vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 2012, **39**(7), 1419-1431.

ZHANG, K., and FREY, H. Road grade estimation for on-road vehicle emissions modeling using light detection and ranging data. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2006, **56**(6), 777-788.